

Schéma général d'hybridation de méthodes numériques d'analyse électromagnétique pour simuler des problèmes d'antennes environnées embarquées sur plate-forme

B. Le Lepvrier¹, R. Loison¹, R. Gillard¹, P. Pouliguen², P. Potier³, R. Contreres⁴, L. Patier⁴, M. Romier⁴

¹UEB, INSA, IETR, Rennes, ²DGA/MRIS, Bagneux, ³DGA/MI, Bruz, ⁴CNES, Toulouse

Renaud.Loison@insa-rennes.fr

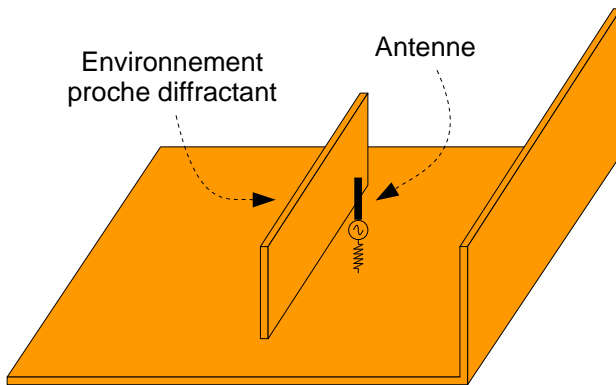


Figure 1. Antenne environnée sur plate-forme.

Résumé

Dans ce papier, un schéma général d'hybridation est proposé pour analyser des problèmes d'antennes environnées sur plate-forme. Une implémentation particulière, la DG-FDTD/IPO avec redescription, est décrite et validée.

1. Introduction

Le placement des antennes sur plates-formes telles que les avions, satellites ou véhicules terrestres étant de plus en plus contraint, elles sont fréquemment disposées à proximité d'éléments potentiellement complexes sur la structure. Un exemple canonique d'antenne environnée embarquée sur plate-forme est présenté sur la figure 1. Ce type d'implantation ayant une forte influence sur les performances finales de l'antenne, il est nécessaire de disposer d'outils de simulation électromagnétique permettant d'évaluer les caractéristiques de l'antenne embarquée.

Le traitement de ces problèmes fortement multi-échelles et électriquement grands constitue un défi numérique pour plusieurs raisons. La figure 2 présente les différentes régions qui doivent être considérées lors de l'analyse du problème de la figure 1. La région 1 contient uniquement l'antenne d'émission et doit bien sûr être simulée rigoureusement et précisément. La région 2 contient l'antenne et son environnement proche. Une simulation rigoureuse est toujours requise pour traiter les

couplages entre l'antenne et l'environnement proche mais la précision peut généralement être relâchée par rapport à la région 1. Enfin, la région 3 correspond à l'ensemble du problème. Ici, la précision peut encore être relâchée et des méthodes approchées peuvent être envisagées pour traiter la plate-forme électriquement grande. Cependant des interactions entre l'antenne, son environnement proche et le reste de la plate-forme peuvent exister et l'analyse du domaine 3 peut nécessiter une description de tous les éléments du problème.

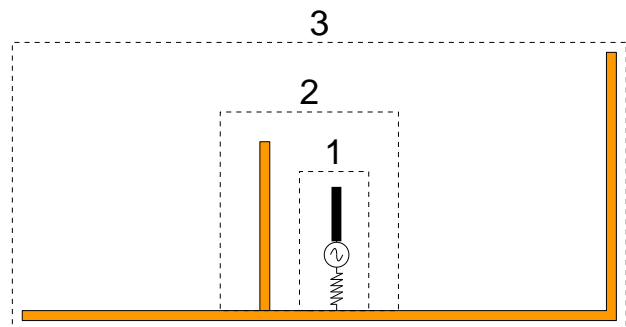


Figure 2. Décomposition en sous-régions de la scène.

L'analyse de ces problèmes requiert donc des approches avancées de type sous-maillage, multirésolution ou encore des hybridations de méthodes. La FDTD à Double Grille MultiLevel (ML-DG-FDTD) a été proposée dans [1] pour analyser des situations de ce type. Cependant, l'approche étant intégralement basée sur la FDTD, elle ne permet pas de considérer une plate-forme très grande en raison des ressources informatiques requises. Dans [2], la DG-FDTD est hybridée avec l'Iterative Physical Optics (IPO). La méthode apporte une réponse à l'analyse de la plate-forme de grande taille mais ne permet pas de décrire les éventuelles interactions entre cette dernière et l'antenne environnée. Dans ce papier, nous proposons d'étendre la méthode afin de résoudre ce problème. Cette extension s'inscrit dans un schéma général d'hybridation qui est défini dans un premier temps.

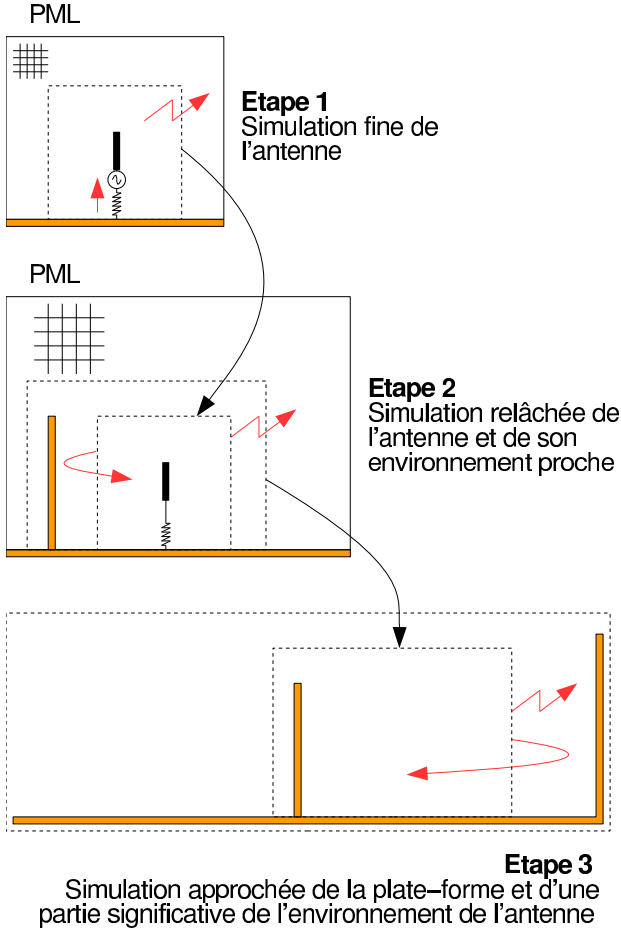


Figure 3. Principe général du schéma d'hybridation.

2. Principe général du schéma d'hybridation et cas particulier de la DG-FDTD/IPO avec redescription

2.a. Principe général

Le principe général est décrit sur la figure 3. Il consiste à simuler successivement les régions 1 à 3 (ou plus généralement N) avec la méthode la plus appropriée pour chaque région (rigoureuse fine, rigoureuse relâchée, asymptotique). La simulation 1 est une simulation rigoureuse et précise de l'antenne d'émission alimentée. Pour les simulations $n \in [2; N]$, l'intégralité de la région n est décrite avec le niveau de précision associé à la méthode utilisée. L'excitation de la simulation n est effectuée via une surface d'excitation "outside" séparant une zone de champ total (extérieure) d'une zone de champ diffracté (intérieure). Cette surface d'excitation entoure le volume associé à la région $n - 1$. Le champ utilisé pour l'excitation est issu de la simulation $n - 1$ (plus précise). De cette manière, toutes les interactions sont prises en compte avec plus ou moins de précision en fonction de la région considérée.

2.b. Cas particulier de la DG-FDTD/IPO avec redescription

La DG-FDTD/IPO constitue une mise en œuvre particulière de l'approche générale (fig. 3).

Les simulations 1 et 2 sont deux simulations FDTD et correspondent aux deux premières étapes de la DG-FDTD [1]. Dans la première simulation FDTD, l'antenne est décrite finement et le volume de calcul est délimité par des conditions absorbantes de type PML. L'antenne est alimentée par un générateur de tension et une surface de prélèvement est définie autour de l'antenne afin d'enregistrer le champ proche. Dans la deuxième simulation FDTD, également délimitée par des PML, l'antenne et son environnement proche sont décrits avec une précision relâchée. Le champ proche prélevé dans la simulation précédente est utilisé pour exciter le volume de calcul via une surface d'excitation de type "outside". Cette surface permet au champ diffracté par l'environnement de revenir vers l'antenne. Ainsi, les interactions entre l'antenne et son environnement proche sont prises en compte dans cette simulation. Une surface de prélèvement de type Huygens est définie autour de l'antenne environnée.

La simulation 3 est une simulation IPO [3, 4] de l'ensemble du problème avec redescription de l'environnement proche de l'antenne. Ici seule l'antenne n'est pas redécrite car trop petite pour être traitée avec l'IPO. Le champ proche sur la surface de Huygens prélevé dans l'étape précédente est utilisé pour calculer les courants équivalents \vec{J}_{eq} et \vec{M}_{eq} qui constituent les sources d'excitation de la simulation IPO. Cette dernière étant une méthode fréquentielle, une transformée de Fourier rapide (FFT) est appliquée afin d'obtenir les courants équivalents dans le domaine fréquentiel. Les premières itérations de la simulation IPO sont décrites à la figure 4. Dans cette simulation :

- les sources \vec{J}_{eq} et \vec{M}_{eq} excitent des courants PO ($\vec{J}_0, \vec{J}_1, \dots$) sur la structure métallique uniquement à l'extérieur de la surface de Huygens,
- les courants PO éclairent l'intégralité de la structure y compris la zone située à l'intérieur de la surface de Huygens.

Cette décomposition correspond à la séparation du volume de calcul en une zone de champ total (extérieur de la surface de Huygens) et une zone de champ diffracté (intérieur). Ainsi, les interactions entre l'environnement proche de l'antenne et le reste de la plate-forme sont prises en compte grâce au schéma itératif de l'IPO. La convergence du processus itératif est suivie à l'aide d'un indicateur ϵ_m comparant le courant PO total à l'itération m et le courant PO total à l'itération $m - 1$:

$$\epsilon_m = \left| 1 - \frac{\sum_i |\vec{J}_{m-1}^i|}{\sum_i |\vec{J}_m^i|} \right|$$

où \vec{J}_m^i est le courant à l'itération m sur la facette i de la surface métallique discrétisée. Cet indicateur est naturellement utilisé pour définir le critère d'arrêt du schéma itéra-

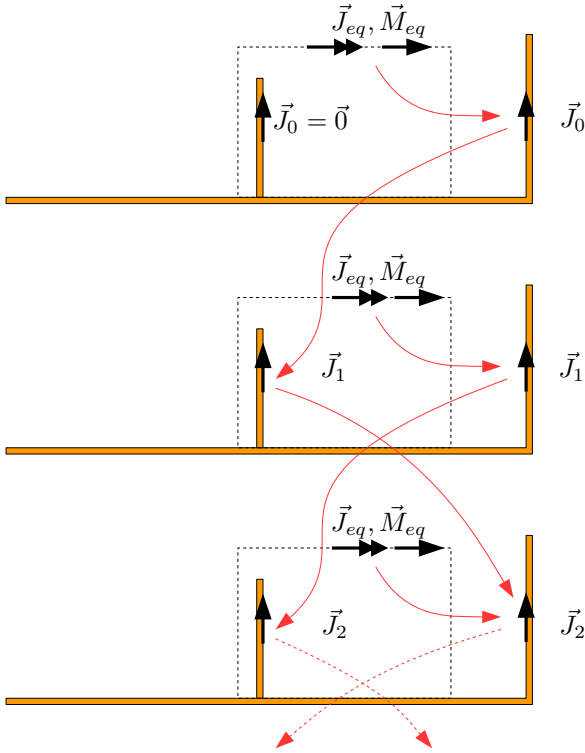


Figure 4. Trois premières itérations de la simulation IPO (simulation 3) de la plate-forme avec redescription de l'environnement proche de l'antenne.

tif. Une étude spécifique portant sur la précision des résultats de simulation nous a permis de fixer le critère d'arrêt de la simulation IPO à $\epsilon_m = 0,001\%$.

A l'issue de la simulation IPO, le champ rayonné par l'ensemble du scénario (antenne environnée et plate-forme) est calculé en sommant les champs rayonnés par les sources d'excitation \vec{J}_{eq} et \vec{M}_{eq} et les courants PO obtenus lors de la dernière itération IPO.

3. Validation et résultats

L'approche décrite dans la partie précédente est utilisée pour traiter le problème métallique de la figure 5 à la fréquence de 1GHz. L'antenne est un simple monopôle.

Plusieurs techniques de simulation sont comparées afin de valider l'approche proposée et de démontrer son intérêt :

- la MLFMM du logiciel Feko constitue la référence,
- la ML-DG-FDTD est une simulation DG-FDTD à trois niveaux (antenne seule, antenne environnée puis antenne environnée sur plate-forme),
- la DG-FDTD/IPO sans redescription exploite l'hybridation présentée dans cet article mais sans redescription de l'environnement proche de l'antenne dans la simulation IPO,
- la DG-FDTD/IPO avec redescription de l'environnement proche de l'antenne dans la simulation IPO.

Les deux premières étapes FDTD sont identiques dans les simulations ML-DG-FDTD et DG-FDTD/IPO avec

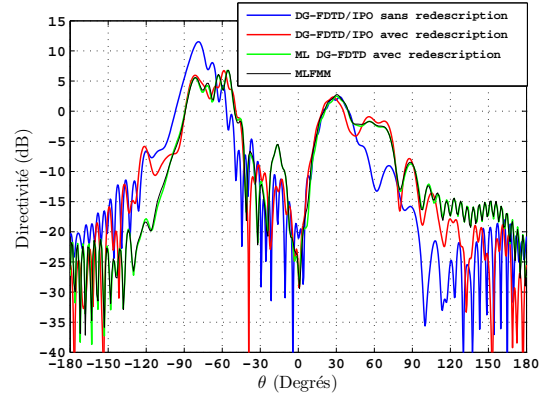


Figure 6. Diagramme de directivité de la composante E_θ à 1GHz dans le plan xOz .

et sans redescription. Les maillages sont respectivement en $\lambda_{1GHz}/60$ (antenne seule) et en $\lambda_{1GHz}/30$ (antenne environnée). Le maillage des simulations IPO est en $\lambda_{1GHz}/4,5$. Avec le critère d'arrêt défini dans la partie précédente, 11 itérations IPO sont nécessaires pour la simulation DG-FDTD/IPO sans redescription et 52 itérations IPO sont nécessaires pour la simulation DG-FDTD/IPO avec redescription. Cela s'explique par la nécessité de décrire complètement les multiples réflexions entre les deux plaques verticales du problème considéré.

Les figures 6 et 7 reportent les courbes de directivité dans les plans xOz et yOz obtenues avec les différentes approches. Comme attendu, la ML-DG-FDTD donne quasiment les mêmes résultats que la MLFMM. La DG-FDTD/IPO sans redescription s'écarte significativement de ces deux résultats de référence car elle ne prend pas en compte les interactions entre l'environnement proche de l'antenne et le reste de la plate-forme. Enfin, la DG-FDTD/IPO avec redescription corrige partiellement ce problème et s'approche des deux résultats de référence. L'écart subsistant s'explique par le caractère approché et non rigoureux de la simulation IPO. Les phénomènes de diffraction ne sont par exemple pas intégrés dans cette simulation.

Ce résultat montre la pertinence du schéma général d'hybridation proposé dans la partie précédente. Il montre également qu'il est possible de le mettre en œuvre dans un schéma hybridant une méthode rigoureuse et une méthode asymptotique itérative.

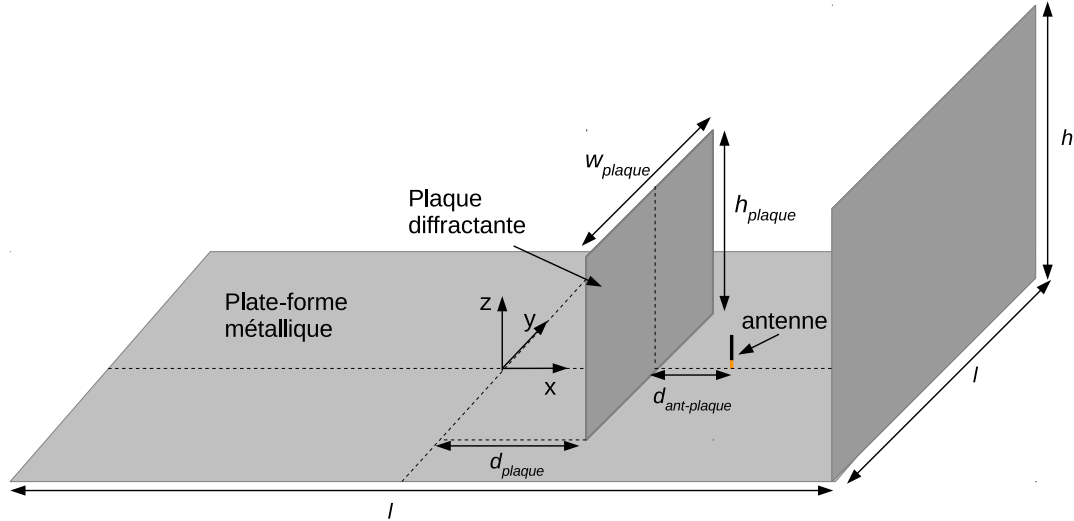


Figure 5. Scenario simulé : $l = 3,9m = 13\lambda_{1GHz}$, $h = 1,15m = 3,83\lambda_{1GHz}$, $d_{plaque} = 0,8m \approx \frac{8\lambda_{1GHz}}{3}$, $d_{ant-plaque} = 0,20m \approx \frac{2\lambda_{1GHz}}{3}$, $h_{plaque} = 0,9m = 3\lambda_{1GHz}$, $w_{plaque} = 1,4m \approx 4,67\lambda_{1GHz}$.

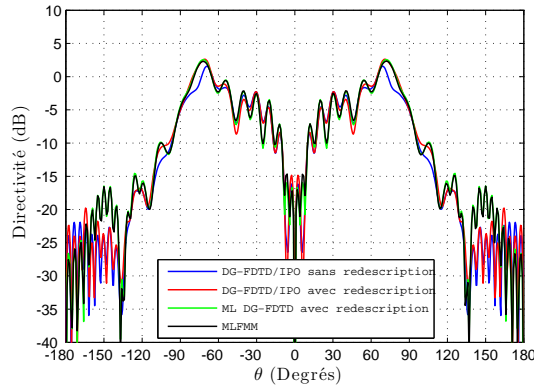


Figure 7. Diagramme de directivité de la composante E_θ à 1GHz (CO-polarisation) dans le plan yOz .

4. Conclusion

Dans ce papier, un schéma général d'hybridation est proposé pour analyser des problèmes d'antennes environnées sur plate-forme. Ce schéma est envisageable avec tout type de méthode numérique. Une mise en œuvre particulière est proposée : la DG-FDTD/IPO avec redescription hybride une méthode rigoureuse multi-échelle dans le domaine temporel (DG-FDTD) avec une méthode asymptotique itérative dans le domaine fréquentiel (IPO). L'approche est validée dans un cas canonique d'antenne environnée embarquée sur plate-forme.

Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre d'une thèse de doctorat cofinancée par la Direction Générale de l'Armement (DGA) et le Centre National des Etudes Spatiales (CNES).

Références

- [1] C. Miry, R. Gillard, and R. Loison, "Multi-level dual-grid finite-difference time-domain approach for the analysis of body implanted antennas," *IET-MAP*, vol. 4, no. 6, pp. 659–666, June 2010.
- [2] B. Le Lepvrier, R. Loison, R. Gillard, P. Pouliguen, P. Potier, and L. Patier, "A new hybrid method for the analysis of surrounded antennas mounted on large platforms," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 5, pp. 2388–2397, May 2014.
- [3] F. Obelleiro-Basteiro, J. Luis Rodriguez, and R. Burkhler, "An iterative physical optics approach for analysing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 4, pp. 356–361, April 1995.
- [4] R. Hémon, P. Pouliguen, H. He, J. Saillard, and J.-F. Damiens, "Computation of em field scattered by an open-ended cavity and by a cavity under radome using the iterative physical optics," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 80, pp. 77–105, 2008.